気象が本線上のレール・車輪間の粘着に及ぼす影響* (すべり粘着台車で得た日光線における粘着の実態)

永瀬和彦*¹, 中村英男*¹, 小林秀之*²

Influence of Weather Condition upon Adhesion between Rails and Running Wheels on Main Lines (Results Investigated on JR Nikko Line by the Slipping Adhesion Test Truck)

Kazuhiko NAGASE, Hideo NAKAMURA, and Hideyuki KOBAYASI

The authors constructed "slipping adhesion test bogie" designed upon a new idea of measuring the coefficient of adhesion continually while running, and have observed the state of adhesion on main lines since 1985. Recently, they placed a car equipped with this bogie on a steep line where wheel-spin and skidding of rolling stock had been frequently the cause of troubles. As the result of runs of the car under various weather conditions such as fine, fog, snow, sleet and frost, influence of the weather condition upon the adhesion between rails and wheels has been made clear and evaluated quantitatively.

Key Words: Railways, Rails and Wheels, Adhesion, Slipping, Skidding

1. はじめに

車両の性能に支配的な影響を及ぼす粘着係数 μ が本線上でどのように変化しているかを調査した研究はあまり多くはない⁽¹⁾⁽²⁾。著者らは本線上におけるレール・車輪間の μ を連続して測定可能な「すべり粘着台車」と名付けた新しい概念の台車を提案した。この台車を装架した車両は、JRの各線を走行し、本線上で μ がどのように変化しているかを明らかにした。さらに、 μ を低下させる主な因子を抽出し、併せて、その定量的な評価をおこなった⁽³⁾。

今回の研究では、晩秋から早春にかけて空転や滑走が多発する JR 日光線に、この台車を装架した車両を乗り入れ、いろいろな気象条件の下で走行させた。その結果、気象が粘着に及ぼす影響とその定量的な評価などを明らかにすることができた。

2. 試験用車両および実験方法

2.1 粘着試験用台車 図1は実験に用いた「すべり粘着台車」概念図を示す。本台車は、心が偏って設

けられ、左の基準軸 D_1 と呼ぶ軸の軸重 W_1 が右のすべり軸 D_2 の軸重 W_2 より重くなっている。両軸は減速機、推進軸およびクラッチを介して接続されている。基準軸 D_1 の車輪半径 r_1 はすべり軸 D_2 の車輪半径 r_2 よりも少しだけ大きい。この状況の下でクラッチを接続するとすべり軸 D_2 はすべり率（すべり速度と対地速度との比）一定ですべり走行し、そのときのすべり率 n は $(r_1 - r_2)/r_1$ となる。すべり軸の粘着係数 μ は推進軸に生ずるせりあいトルクをすべり軸の軸重 W_2 で割ることによって、得ることができる。

2.2 実験用車両 今までの研究では、実験に使う車両は、実験を行うごとに走行線区の車両を改造してすべり粘着台車を装架させていた。この改造に要す

図1 「すべり粘着台車」の概念

* 平成元年10月15日 第67期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成元年4月7日。

*¹ 正員、鉄道総合技術研究所 (〒185 国分寺市光町3-8-38)。

*² 鉄道総合技術研究所。

る手数を省くため、JR 総研ではこの台車を装架した粘着試験専用の電車を最近新たに整備した⁽⁴⁾。この電車は走行用の主電動機は持っていない。しかし、運転台を持つ制御車なので、JR の多くの形式の電車と連結して総括制御によって本線を走行できる。電化していない線区は機関車のけん引により走行する。電車の外観を図 2 に示す。

2.3 実験線 実験は日光線で行われた。この線の起点からわずか 40 km 離れた終点日光駅は、起点の宇都宮駅より標高差で 500 m 近くも高い。日光駅近くは 2.5 % の連続こう配となっている。列車の運転は 5 時（以下 5:00 と略記する）から 23:00 までの間 30~60 min ごとに 2~6 両編成の電車により行われている。この線は晩秋から早春にかけては雪、霧、氷雨、霜などレール・車輪間の粘着を低下させるとみなされている気象にしばしば見舞われる。加えて、具合の悪いことに、この季節には沿線に繁茂する針葉樹から油脂を含んだ多量の落葉が軌道の上に落下する。このため、この季節には電車は上りこう配でしばしば空転し、最悪の場合には立往生することもある。線路は全線が単線で、1 m 当たりの質量が 50 kg、長さ 25 m のレールを使用している。途中に、行き違い（交換）設備を持つ五つの駅がある。

2.4 試運転列車の運転 試運転列車は気象が最も変化しやすい 3 月の初めに延べ 5 日間にわたり運転された。試運転列車は試験車に普通の電動電車 2 両を連結して合計 3 両編成で組成された。すべり粘着台車のすべり軸は日光駅方へ向かうときは列車の先頭から第 11 軸めに位置し、宇都宮駅方へ向かう場合は第 2 軸めに位置する。試運転列車は μ が最も低下するとされる早朝の 4:00 から軌道が乾燥して粘着が向上する午後まで、区間運転を含め 4~5 往復運転された。

2.5 粘着の測定方法 粘着係数 μ の測定は実験走行区間のほぼ全域にわたり行った。 μ を統計的に処

理した値を得るために、走行時に車輪 1 回転当たり 1 回の割合で μ を測定して得た全区間の μ を 10 km/h ほどの速度域別に分け、それぞれの速度域における μ の分布を 0.01 間隔の百分率で表した値を求めた。さらに、 μ を正規分布と仮定してその標準偏差を求めた。すべり軸の車輪の踏面は研磨用制輪子により合成制輪子使用時のそれとほぼ同じ粗さに維持した。すべり軸のすべり率 n は 0.05 である。

3. 実験と考察

3.1 気象が粘着に及ぼす影響 気象が粘着に及ぼす影響を調べるため、試験運転実施中の間いろいろな気象条件の下で、下野大沢-今市駅間で同じ時刻に試運転列車を走らせた。この列車で測定して得た粘着係数 μ を以下に示す。試運転列車は下野大沢駅を日光駅方に向けて 7:20 に発車する。駅間は畑と常緑針葉樹の杉とひのきの並木と林が線路に近接して存在する。図 3 に沿線の状況を写した写真を示す。

3.1.1 晴天時の粘着 図 4 は、晴天時の μ を示す。曲線 A は降霜が著しい日（3 月 2 日）に得たデータを示す。当日の早朝に、曲線 A に示す列車より以前にこの区間をすでに 5 本の電車と 2 本の試運転列車が通過している。早朝に運転されたこれら 2 本の試運転列車（そのうちの 1 本の列車は一番列車として 5:00 ごろ、この区間に運転された。）で得た μ もほぼこれと同じ結果を得た。ただ、早朝から日が良く当たる箇所、例えば（宇都宮起点）33.5 km 付近で本列車が得た μ は早朝のものよりやや良好な傾向を示した。両側に畑のある区間はまくら木が真っ白になるほどの降霜があった。このような所では μ は著しく低下している。他方、沿線に林が近接する区間は樹木が降霜を防いでいるため、 μ は他の区間のそれより高い値を維持している。 μ が低い畑の中にあっても、陸橋が降霜を防ぐ地点の μ は局所的に向上している。踏切上では自動車の

図 2 粘着試験車の外観

図 3 日光線沿線の状況（今市-下野大沢間）

タイヤからレール踏面に転写された泥によって、分岐器上ではレール踏面にしみでた床板に塗布された油の影響によって、 μ は局所的に低下した。

曲線 B は晴天時、降霜のない日（3月3日）に得たデータを示す。軌道や沿線の草木は、朝露でぬれていた。樹木の影響で朝露の少ない林中は、 μ も比較的高い。反対に多量の露が降りた畑の中での μ は低い。しかし、早朝から日の当たる 33.5 km 付近（今市駅近く）の畑の中で得た μ は良好である。陸橋、踏切、分岐器上での μ の挙動は前日（3月2日）の同じ列車で得たものと同じ傾向を示す。

曲線 C は曲線 A を得た日（3月2日）の午後、外気

温が 11°C に上昇し、軌道が十分乾燥した状態の下で、別の時刻に試運転列車を運転して得た μ の状態を示す。この列車は下野大沢駅を 12:15 に発車した。 μ はほとんどの区間で曲線 A および曲線 B に比べ高い。ここで、注目すべきは、霜や露の降るのを防ぎ、 μ の低下防止に役だっている林や陸橋のある地点では、昼間は μ はむしろ低い。31.2 km 付近にある陸橋ではその傾向が顕著に現れている。樹木や陸橋が日照を阻害し、軌道が乾燥しないためであろう。深い林に囲まれ、日当たりの悪い 33 km 付近は同じ理由によって、たとえ昼間でも μ は早朝のそれと同じ値を維持している。

図 4 晴天時の粘着係数 (JR 日光線, 下野大沢-今市間)

図 5 悪天候時の粘着係数 (JR 日光線, 下野大沢-今市間)

以上のように、同じ晴天時でも、 μ は霜、露の有無などによって大きく変動し、加えて、沿線的环境によってさらに大きく変化する。つまり、晴天時には、沿線的环境は μ に対し大きな可変因子として作用する。

3・1・2 悪天候時の粘着 図5は粘着係数 μ が大きく低下すると言われるみぞれ、霧、雪のときに得たデータを示す。曲線Dは霧の日に得た μ である。 μ は

朝露が降りたとき(図4の曲線B)と同じように大きく変化している。霧の流れる道すじに当たる切通しや林が両側にある地点は μ が顕著に低くなっている。霧のかかったときにも、沿線的环境は μ に対し大きな可変因子として作用する。

曲線Eは雪、曲線Fはみぞれまじりの雨の際に得た μ である。これらの天候の下では、レール踏面が均

(a) 晴天, 降雨

(b) 晴天, 朝露

(c) 晴天, 乾燥

(d) 霧

(e) 雪

(f) みぞれ

図6 各天候下における速度域別粘着係数の分布と平均値 (JR日光線, 鹿沼-日光間)

等に湿潤化するため、陸橋下などの特殊な地点を除いては μ は低い値で安定し、沿線環境の影響をあまり受けない。曲線 F は、29 km 付近で μ がほぼ零に近い値を示す。前日（3月6日）12:00 ごろ、この付近のレール上に多量の生の杉の葉を散布し、別の試運転列車に踏ませた。その影響が残ったためである。この列車の電動車の駆動軸はこの地点で空転した（図示しない）。

3・2 粘着係数を統計処理した値 図 6 の (a), (b), (d), (e), (f) に示す曲線群は、延べ 5 日にわたり、いろいろな条件の下で下野大沢-今市間を運転した 9883 M 列車の始発駅である鹿沼から終着駅日光までの間 26 km の全域で得た μ の、速度域別の分布とその平均値 $\bar{\mu}$ を示す。この列車は鹿沼を 7:03 に発車し、日光には 7:40 に着く。霜が解け、朝露が乾き、あるいは霧が晴れて軌道が乾燥した日中に、同じ区間を 9883 M 列車と同一方向（日光駅方）に向かって運転した試運転列車はなく、このような条件の下での μ の分布を示すことはできない。そこで、日中のデータに限っては、逆の宇都宮方面に向かって運転した 9888 M 列車のデータを図 6 (c) に示す。この列車は日光を 13:08 に発車し、鹿沼には 13:45 に到着する。

$\bar{\mu}$ は雪 [図 6 (e)] やみぞれ [図 6 (f)] のときに低く、両者ともほぼ同じ傾向を示す。図から明らかにように低速域を除き μ に速度依存性は認められない。この結果は著者が先に東京の山手線で雨の降り始めに得たデータ⁽³⁾とは異なる。このような差異が生じた原因は、恐らくは、山手線で雨の降り初めに μ を得たときの状況（レールへの塗油などによりレール踏面が汚れた状態）と日光線の状況とは異なり、もともとレール面上の汚れが少なく、加えて、雨がレール面上の汚れを洗い流したためであろう。

図 6 (a) に示す降霜、図 6 (e) に示す降雪、図 6 (f) に示すみぞれのあった朝の μ の値は低い。一方、図 6 (a), (b), (c), (d) (霜、露、乾燥、霧) のデータをみると、これらはいずれも、速度依存性は認められない。さらに、 μ の分布をみると、図 6 (c), (e), (f) はほぼ正規分布の形をしている。それ以外のものは不規則な分布となっている。

図 7 に図 6 (e) (雪) に示した μ についての平均値 $\bar{\mu}$ 、 μ の標準偏差 σ および μ の最低値 $\mu_{\min}$ を示し、図 8 に図 6 (b) (朝露) の $\bar{\mu}$ 、 σ および $\mu_{\min}$ を示す。図 7 においては $\mu_{\min}$ は $\bar{\mu}-3\sigma$ とほぼ一致している。つまり、このような気象条件下(雪)での μ の分布は正規分布に近い形態をとることがわかる。一方、朝露のときの σ は大きく、正規分布の形態をなしていない。

4. 結 論

すべり粘着台車を装架した車両を JR 日光線に入線させ、いろいろな気象条件の下で粘着係数を調べた。その結果、次のようなことがわかった。

- (1) 気象は粘着係数に深く関与する。
- (2) 特定の気象条件の下では、沿線の環境は粘着係数に対し可変因子として大きく作用する。
- (3) 上記の可変因子には、沿線の地目および地形、樹木、林の形態（林相）、構造物など実に多様なものがある。
- (4) みぞれ、雪は粘着係数をほぼ同じように低下させる。
- (5) みぞれ、雪などレール踏面を均等に湿潤化させる気象条件の下では、粘着係数は沿線環境の影響を受けることは少ない。

図 7 降雪時 [図 6 (e)] における粘着係数の平均値、標準偏差および最低値の関係 (JR 日光線、鹿沼-日光間)

図 8 朝露時 [図 6 (b)] における粘着係数の平均値、標準偏差および最低値の関係 (JR 東日光線、鹿沼-日光間)

(6) 晴天の日中で軌道が良く乾燥したときおよび降雨などによりレール踏面が均等に湿潤化されたときには、粘着係数の変化は正規分布に近い傾向を示す。

(7) 今回の試験で遭遇した多くの気象条件の下で、粘着係数に速度依存性を認めることは困難であった。

おわりに

本研究の計画を立てるに際しては、JR 東日本東京圏運行本部運輸車両部 三宅一郎氏をはじめとする関係各位の多大のご協力を得た。本線試運転の実施に際しては、JR 東日本大井工場、小金井と宇都宮の各運転

所の乗務員および検査担当者ならびに宇都宮保線区の関係各位のご協力とご援助を得た。粘着の測定およびデータの整理については当研究室の熊谷則道、舟津浩二氏を始めとする多くの方々にご協力を得た。これらの各位に深謝の意を表します。

文 献

- (1) 例えば, Logston, C. F. and Itami, G. S., *Trans. ASME.*, 102-8 (1986), 275.
- (2) Boiteux, M., *Rev. Genera. Chem.*, 105-2 (1986), 59.
- (3) Nagase, K., *Proc. I Mech E.*, 203-F 1 (1989), 33.
- (4) 永瀬, 鉄道ファン, 27-8 (1987), 49.

討 論

〔質問〕 下 間 頼 一〔関西大学工学部〕

「油分が含まれる落葉がレール踏面にたまと影響が大きい」という部分について以下に質問させていただく。

(1) 油分とは植物性油か、鉱物性油か。

(2) 油の種類によって境界潤滑のメカニズムが非常に異なることが知られているが、貴研究の場合、いかがか。

〔回答〕 (1) 落葉に含まれる油であるから、植物油である。

(2) 落葉を踏んだときのレール-車輪間の状態がどのようなものであるかは明らかではない。しかし、ご指摘のような「境界潤滑」の状況下に完全にあるわ

けではないと思われるふしがある。というのは、車輪に踏まれた落葉はペースト状となって、レールに付着し、一部は車輪踏面に転写されているからである。したがって、車輪のすべりによって落葉の植物繊維同志が互いに摩擦、接触し、さらに一部ではせん断が行われていると推定される。とは言っても、著者は潤滑の状態を全く否定しているわけではない。というのは、同じ落葉でも油脂の含有が少ない広葉樹の場合には、粘着低下は針葉樹ほど多くはないからである。

落葉を踏んだとき、車輪踏面では、植物繊維の摩擦・せん断に加え、落葉からしみ出た油によって一部で潤滑状態になっているのではと考えている。